ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1999
Seria: ELEKTRYKA z. 168 Nr kol. 1418

Władysław MIZIA

PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI AUTOTRANSFORMATORA O UZWOJENIU TRÓJCZĘŚCIOWYM ZASTĘPUJĄCEGO TRANSFORMATOR TRÓJUZWOJENIOWY

Streszczenie. W pracy podano podstawowe właściwości transformatora trójuzwojeniowego i przedstawiono nowy typ autotransformatora, którego uzwojenie jest trójczęściowe i który może zastępować transformator trójuzwojeniowy, jeżeli nie zachodzi potrzeba elektrycznego rozdzielenia strony pierwotnej i stron wtórnych. Określono prądy i moce części składowych – szeregowej i dwóch wspólnych – uzwojenia autotransformatora przy zadanych napięciach znamionowych i mocach obciążenia stron wtórnych wykazując duży wpływ tzw. współczynników redukcji zależnych od przekładni napięciowych. Przeprowadzono również porównanie autotransformatora o uzwojeniu trójczęściowym z transformatorem trójuzwojeniowym i wykazano, że zastosowanie autotransformatora zmniejsza znacznie koszty budowy i koszty energii strat związanych z transformowaniem napięć.

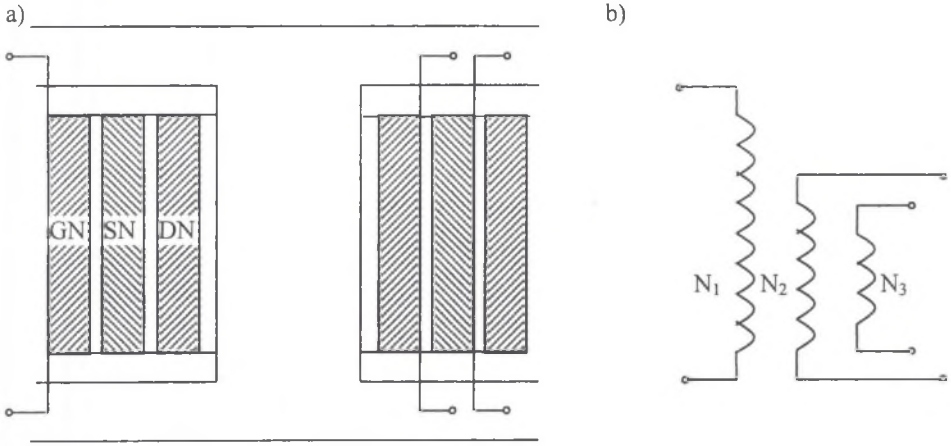
BASIC PROPERTIES OF A THREE-PART WINDING AUTOTRANSFORMER REPLACING A THEREE-WINDING TRANSFORMER

Summary. The new type of an autotransformer whose winding consists of three parts and which can replace a three-winding transformer if three is no need of electric separation of the primary side from the secondary ones has been presented in the paper. The basic properties of the three-winding transformer have been given. Currents and powers of the autotransformer winding component parts – a series one and two common ones – at the rated voltages and load powers of the secondary sides have been determined and the great influence of the so-called reduction coefficients which depend on voltage ratios has been shown. Comparison of the autotransformer with three-part winding and the three-winding transformer has also been made. It has been proved that use of the autotransformer results in reduction of manufacturing costs as well as costs of loss of energy due to voltage transformation.

1. PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI TRANSFORMATORA TRÓJUZWOJENIOWEGO

Transformator trójuzwojeniowy ma trzy izolowane względem siebie uzwojenia, zwykle cylindryczne, umieszczone współśrodkowo na kolumnie rdzenia magnetycznego. Jedno z uzwojeń jest zasilane, a więc pierwotne, a pozostałe są uzwojeniami wtórnymi, do których są przyłączone odbiory.

W transformatorze trójuzwojeniowym obciążającym napięcie uzwojeniem pierwotnym jest uzwojenie górnego napięcia, uzwojeniami wtórnymi są: uzwojenie średniego napięcia, uzwojenie dolnego napięcia, a rozmieszczenie uzwojeń na kolumnie rdzenia magnetycznego jest takie, jak podano na rys. 1.



Rys. 1. Transformator trójuzwojeniowy obniżający napięcie: a) rozmieszczenie uzwojeń górnego (GN), średniego (SN) i dolnego (DN) napięcia, b) schemat
Fig. 1. Three – winding transformer: a) arrangement of windings, b) diagram

Transformatory trójuzwojeniowe mogą być jednofazowe lub trójfazowe. Transformatory trójuzwojeniowe jednofazowe mają zwykle małe moce i służą do zasilania odbiorów o różnych napięciach znamionowych, np. podzespołów układów regulacji. Transformatory trójuzwojeniowe trójfazowe znajdują zastosowanie w przesyłowych systemach elektroenergetycznych i służą do jednoczesnego zasilania dwóch sieci przesyłowych o różnych napięciach. Transformatory trójuzwojeniowe stosowane w elektroenergetyce mają duże moce znamionowe, dochodzące do kilkudziesięciu MV·A.

Mocą znamionową transformatora trójuzwojeniowego jest największa spośród mocy znamionowych jego uzwojeń. W transformatorze obciążającym napięcie moc znamionowa uzwojenia górnego napięcia jest równa mocy znamionowej transformatora. Moce znamionowe pozostałych uzwojeń zależą od przewidywalnych współczynników mocy

odbiorów, ponieważ dąży się do możliwie pełnego wykorzystania transformatora. W typowych transformatorach trójuzwojeniowych obniżających napięcie względne moce znamionowe uzwojeń średniego i dolnego napięcia odniesione do mocy znamionowej transformatora ujmuje tabela 1.

Tabela 1

Lp.	UZWOJENIE		
	górnego napięcia	średniego napięcia	dolnego napięcia
1	1	1	1
2	1	1	0,67
3	1	0,67	0,67

Napięcia zwarcia poszczególnych par uzwojeń transformatora trójuzwojeniowego nie są jednakowe i zależą m.in. od rozmieszczenia uzwojeń na kolumnie rdzenia magnetycznego. W transformatorze trójuzwojeniowym obniżającym napięcie, o rozmieszczeniu uzwojeń podanym na rys. 1a, względne napięcia przeliczone na moc znamionową transformatora mogą np. wynosić:

u_{z12r} =0,105 dla pary uzwojeń GN – SN,

u_{z13r} =0,17 dla pary uzwojeń GN – DN,

u_{z23r} =0,06 dla pary uzwojeń SN – DN,

Transformator trójuzwojeniowy jednofazowy lub trójfazowy zastępuje dwa transformatory dwuuzwojeniowe odpowiednio jednofazowe lub trójfazowe. Uzyskuje się przez to zmniejszenie zużycia blach, przewodów nawojowych, kosztów wykonania oraz kosztów strat energii związanych z transformowaniem napięć.

Dla transformatora trójuzwojeniowego obciążającego napięcie [3] względny prąd obciążenia strony pierwotnej

$$i_{1r} = \frac{I_1}{I_{1n}} = \sqrt{i_{2r}^2 + i_{3r}^2 + 2i_{2r}i_{3r}\cos(\varphi_3 - \varphi_2)}, \tag{1}$$

przy czym

$$i_{2r} = \frac{I_2}{I_{2n}} \frac{S_{2n}}{S_n}, \tag{2}$$

$$i_{3r} = \frac{I_3}{I_{3n}} \frac{S_{3n}}{S_n}, \tag{3}$$

$\cos\varphi_2$, $\cos\varphi_3$ – współczynniki mocy odbiorów po stronie średniego i dolnego napięcia,

I_2, I_{2n}, I_3, I_{3n} – prąd obciążenia i prąd znamionowy strony średniego i dolnego napięcia,

S_{2n}, S_{3n} – moce znamionowe uzwojeń strony średniego i dolnego napięcia,

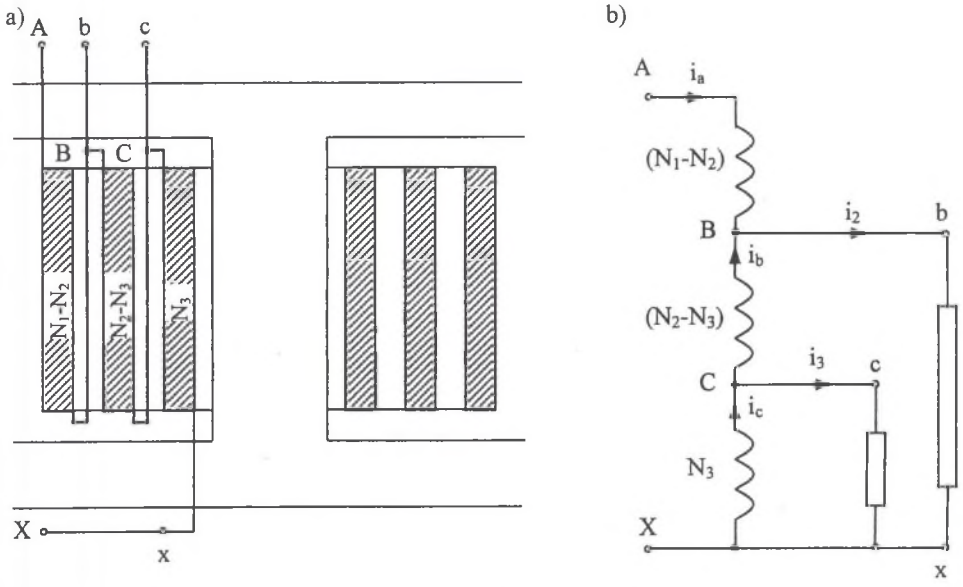
S_n – moc znamionowa transformatora (uzwojenia górnego napięcia).

Prąd, a więc i straty w uzwojeniu pierwotnym, zależą od prądów obciążenia stron wtórnych, rodzajów odbiorów i ich współczynników mocy.

Korzystny, ze względu na zmniejszenie kosztów strat energii w uzwojeniu w czasie eksploatacji transformatora, jest przypadek, gdy jedna ze stron wtórnych jest obciążona odbiorem rezystancyjno - indukcyjnym, a druga rezystancyjno - pojemnościowym. W szczególnym przypadku, gdy jeden z odbiorów jest indukcyjny, a drugi pojemnościowy, $\varphi_2 - \varphi_3 = \pi$, a zatem względny prąd $i_{1r} = i_{2r} - i_{3r}$. Zwykle strony wtórne są obciążone odbiorami rezystancyjno-indukcyjnymi różniącymi się współczynnikami mocy.

2. AUTOTRANSFORMATOR O UZWOJENIU TRÓJCZĘŚCIOWYM – PRĄDY I MOCE CZĘŚCI SKŁADOWYCH UZWOJENIA

Autotransformator z uzwojeniem trójczęściowym (rys. 2) może zastępować transformator trójuzwojeniowy obciążający napięcie, jeżeli nie zachodzi potrzeba elektrycznego rozdzielenia strony pierwotnej i stron wtórnych.



Rys. 2. Autotransformator z uzwojeniem trójczęściowym, a) rozmieszczenie części składowych uzwojenia, b) schemat

Fig. 2. Three – part winding autotransformer, a) arrangement of the winding component parts, b) diagram

W autotransformatorze trójczęściowym (rys. 2) część:

- szeregowa A – B ma liczbę zwojów ($N_1 - N_2$),
- wspólna B – C ma liczbę zwojów ($N_2 - N_3$),
- wspólna C – X ma liczbę zwojów N_3.

Można przyjąć, że przekładnie zwojowe są równe przekładniom napięciowym i przy podanych liczbach zwojów poszczególnych części uzwojenia przekładnie:

$$n_2 = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{1}{1-r_2}, \tag{4}$$

$$n_3 = \frac{N_1}{N_3} = \frac{U_{1n}}{U_{3n}} = \frac{1}{1-r_3}, \tag{5}$$

przy czym tzw. współczynniki redukcji

$$r_2 = 1 - \frac{1}{n_2} = \frac{U_{1n} - U_{2n}}{U_{1n}}, \tag{6}$$

$$r_3 = 1 - \frac{1}{n_3} = \frac{U_{1n} - U_{3n}}{U_{1n}}. \tag{7}$$

Dla autotransformatora (rys. 2) prądy:

$$i_2 = i_a + i_b, \tag{8}$$

$$i_3 = i_c - i_b, \tag{9}$$

a przy pominięciu prądu jałowego

$$i_a(N_1 - N_2) - i_b(N_2 - N_3) - i_c N_3 = 0. \tag{10}$$

Na podstawie równań (4,5,8,9,10) prądy:

$$i_a = (1-r_2)i_2 + (1-r_3)i_3 \tag{11}$$

$$i_b = r_2 i_2 - (1-r_3)i_3, \tag{12}$$

$$i_c = r_2 i_2 + r_3 i_3 \tag{13}$$

Przy przebiegach sinusoidalnych i zadanych prądach znamionowych I_{2n}, I_{3n} stron wtórnych:

- prądy znamionowe części wspólnych uzwojenia

$$\underline{I}_{cn} = r_2 \underline{I}_{2n} + r_3 \underline{I}_{3n}, \tag{14}$$

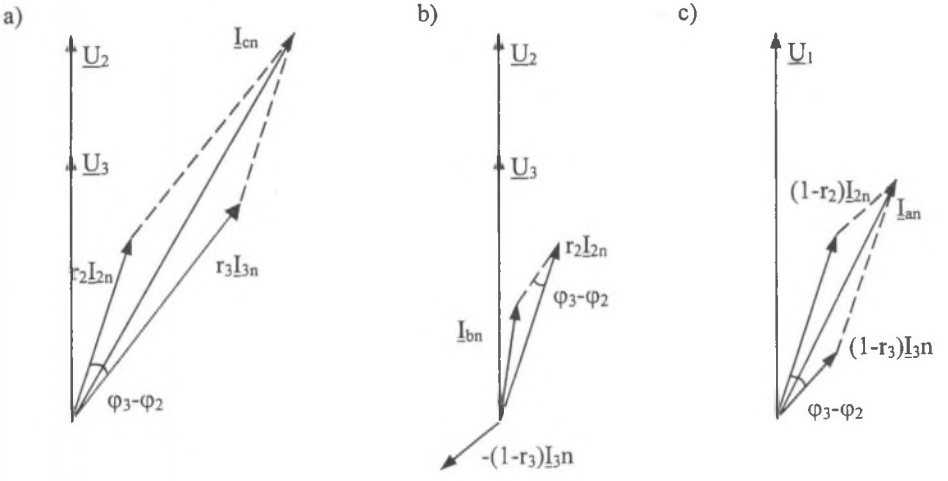
$$\underline{I}_{bn} = r_2 \underline{I}_{2n} - (1-r_3)\underline{I}_{3n}, \tag{15}$$

- prąd znamionowy w części szeregowej uzwojenia

$$\underline{I}_{an} = (1-r_2)\underline{I}_{2n} + (1-r_3)\underline{I}_{3n}. \tag{16}$$

Współczynniki mocy odbiorów $\cos\varphi_2$, $\cos\varphi_3$ zwykle nie są jednakowe.

Przyjmując, że odbiory są rezystancyjno-indukcyjne i pomijając różnicę przesunięć fazowych napięć stron wtórnych powodowaną obciążeniem otrzymuje się wykresy wskazowe przedstawione na rys. 3.



Rys. 3. Wykresy wskazowe napięć i prądów
Fig. 3. Phasor diagram of voltages and currents

Na podstawie wykresów wskazowych (rys. 3) przy znamionowych prądach obciążenia:

- prądy części wspólnych uzwojenia

$$I_{cn} = \sqrt{r_2^2 I_{2n}^2 + r_3^2 I_{3n}^2 + 2r_2 r_3 I_{2n} I_{3n} \cos(\varphi_3 - \varphi_2)}, \tag{17}$$

$$I_{bn} = \sqrt{r_2^2 I_{2n}^2 + (1-r_3)^2 I_{3n}^2 - 2r_2(1-r_3) I_{2n} I_{3n} \cos(\varphi_3 - \varphi_2)}, \tag{18}$$

- prąd części szeregowej uzwojenia

$$I_{an} = \sqrt{(1-r_2)^2 I_{2n}^2 + (1-r_3)^2 I_{3n}^2 + 2(1-r_2)(1-r_3) I_{2n} I_{3n} \cos(\varphi_3 - \varphi_2)}. \tag{19}$$

Uwzględniając, że:

$$\frac{I_{2n}}{I_{3n}} = \frac{S_{2n}}{S_{3n}} \cdot \frac{U_{3n}}{U_{2n}} = \frac{S_{2n}}{S_{3n}} \cdot \frac{1-r_3}{1-r_2} \tag{20}$$

otrzymuje się:

$$I_{cn} = I_{3n} \sqrt{r_3^2 + \left(\frac{S_{2n}}{S_{3n}}\right)^2 \left(\frac{1-r_3}{1-r_2}\right)^2 r_2^2 + 2r_2 r_3 \frac{S_{2n}(1-r_3)}{S_{3n}(1-r_2)} \cos(\varphi_3 - \varphi_2)}, \tag{21}$$

$$I_{bn} = I_{2n}\sqrt{r_2^2 + \left(\frac{S_{3n}}{S_{2n}}\right)^2 (1-r_2)^2 - 2r_2(1-r_2)\frac{S_{3n}}{S_{2n}}cos(\varphi_3 - \varphi_2)}, \tag{22}$$

$$I_{an} = (1-r_2)I_{2n}\sqrt{1 + \left(\frac{S_{3n}}{S_{2n}}\right)^2 + 2\frac{S_{3n}}{S_{2n}}cos(\varphi_3 - \varphi_2)}. \tag{23}$$

Z wyrażeń (6, 7) wynika, że:

$$\frac{U_{2n} - U_{3n}}{U_{2n}} = \frac{r_3 - r_2}{1 - r_2} \tag{24}$$

$$\frac{U_{1n} - U_{2n}}{U_{2n}} = \frac{r_2}{1 - r_2}, \tag{25}$$

a więc moce własne części:

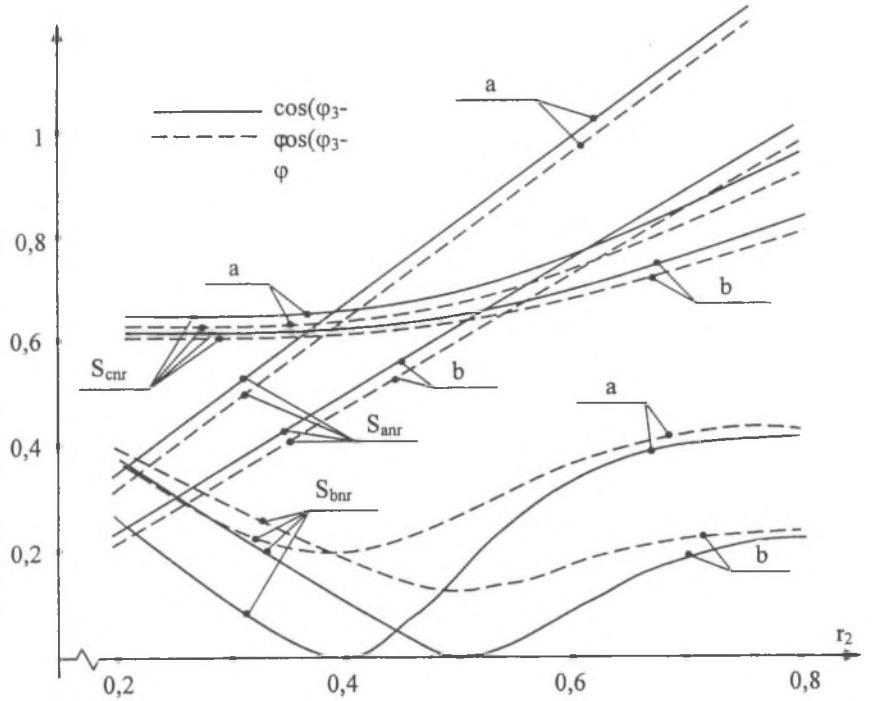
- wspólnych uzwojenia

$$S_{cn} = S_{3n}\sqrt{r_3^2 + \left(\frac{S_{2n}}{S_{3n}}\right)^2 \left(\frac{1-r_3}{1-r_2}\right)^2 r_2^2 + 2r_2r_3\frac{S_{2n}}{S_{3n}}\left(\frac{1-r_3}{1-r_2}\right)cos(\varphi_3 - \varphi_2)}, \tag{26}$$

$$\begin{aligned} S_{bn} &= \frac{U_{2n} - U_{3n}}{U_{2n}} S_{2n}\sqrt{r_2^2 + \left(\frac{S_{3n}}{S_{2n}}\right)^2 (1-r_2)^2 - 2r_2(1-r_2)\frac{S_{3n}}{S_{2n}}cos(\varphi_3 - \varphi_2)} \\ &= S_{2n}(r_3 - r_2)\sqrt{\left(\frac{r_2}{1-r_2}\right)^2 + \left(\frac{S_{3n}}{S_{2n}}\right)^2 - 2\frac{r_2}{1-r_2}\left(\frac{S_{3n}}{S_{2n}}\right)cos(\varphi_3 - \varphi_2)}, \end{aligned} \tag{27}$$

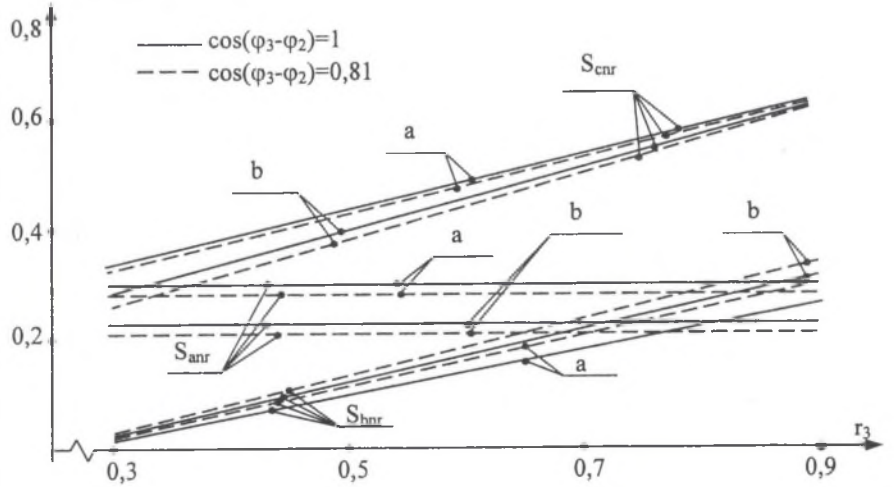
- szeregowej uzwojenia

$$\begin{aligned} S_{an} &= \frac{U_{1n} - U_{2n}}{U_{2n}} S_{2n}(1-r_2)\sqrt{1 + \left(\frac{S_{3n}}{S_{2n}}\right)^2 + 2\frac{S_{3n}}{S_{2n}}cos(\varphi_3 - \varphi_2)} \\ &= r_2 S_{2n}\sqrt{1 + \left(\frac{S_{3n}}{S_{2n}}\right)^2 + 2\left(\frac{S_{3n}}{S_{2n}}\right)cos(\varphi_3 - \varphi_2)}. \end{aligned} \tag{28}$$



Rys. 4. Zależności S_{cnr} =f (r_2), S_{bnr}=f (r_2), S_{anr} =f (r_2) przy r_3=0,9 dla a) S_{2nr}=1, S_{3nr}=0,67, b) S_{2nr}=S_{3nr}=0,67

Fig. 4. Dependences S_{cnr} =f (r_2), S_{bnr}=f (r_2), S_{anr} =f (r_2) at r_3=0,9 for a) S_{2nr}=1, S_{3nr}=0,67, b) S_{2nr}=S_{3nr}=0,67



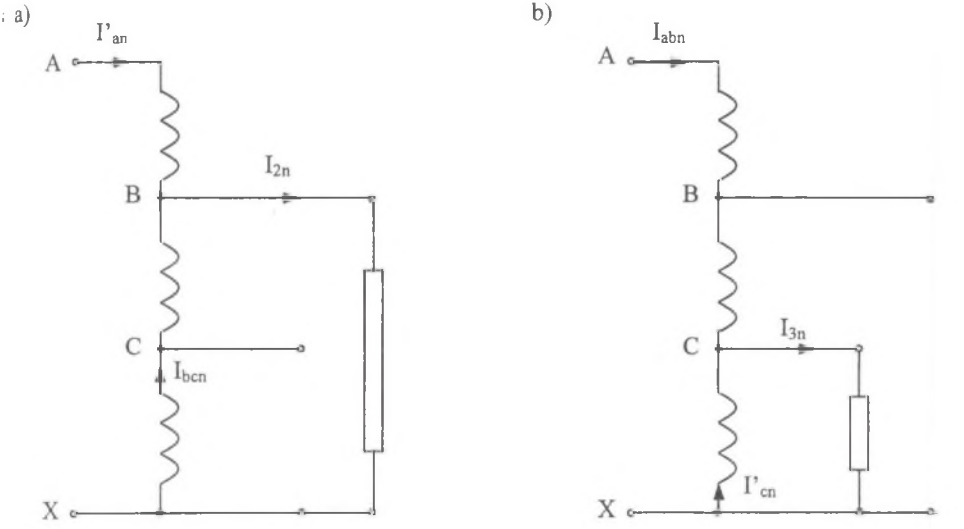
Rys. 5. Zależności S_{cnr}= f(r_3), S_{bnr}=f (r_3), S_{anr}=f (r_3) przy r_2=0,2, dla a) S_{2nr}=1, S_{3nr}=0,67, b) S_{2nr}=0,67, S_{3nr}=0,67

Fig. 5. Dependences S_{cnr}= f(r_3), S_{bnr}=f (r_3), S_{anr}=f (r_3) at r_2=0,2, for a) S_{2nr}=1, S_{3nr}=0,67, b) S_{2nr}=0,67, S_{3nr}=0,67

Na rys. 4, 5 przedstawiono zależności względnych mocy S_{cnr}, S_{bnr}, S_{anr} części s składowych uzwojenia od współczynników redukcji przy zadanych względnych mocach z znamionowych stron wtórnych $S_{2nr} = 1$, $S_{3nr} = 0,67$ oraz $S_{2nr} = 0,67$, $S_{3nr} = 0,67$ dla $\cos(\varphi_3 - \varphi_2) = 1$ oraz $\cos(\varphi_3 - \varphi_2) = 0,8$.

Z rys. 4, 5 wynika, że względna moc części wspólnej (B – C) uzwojenia $S_{bnr} < 0,4$ ı w znacznym stopniu zależy od współczynników mocy odbiorów i może być równa zero ((rys. 4) przy jednakowych współczynnikach mocy odbiorów i odpowiednio dobranych ı współczynnikach redukcji dla zadanych względnych mocy znamionowych stron wtórnych. ; $S_{bnr}=0$ oznacza, że prąd w części wspólnej (B – C) uzwojenia (rys. 2) jest równy zero.

Autotransformator powinien zapewniać niezależne znamionowe obciążenie każdej ze : stron wtórnych (rys. 6).



Rys. 6. Schematy autotransformatora przy znamionowym obciążeniu: a) strony średniego napięcia, b) strony dolnego napięcia

Fig. 6. Diagrams of the autotransformer for the rated load of: a) the medium voltage side, b)the low voltage side

Z zależności (18, 19) wynika, że przy znamionowym obciążeniu tylko strony średniego napięcia (rys. 6a) prąd:

- w części wspólnej, którą stanowią części (B – C) i (C – X) uzwojenia

$$I_{bcn} = r_2 \, I_{2n}, \tag{29}$$

- w części szeregowej

$$I'_{an} = (1 - r_2) I_{2n}. \tag{30}$$

Z zależności (17, 19) wynika, że przy znamionowym obciążeniu tylko strony dolnego napięcia (rys. 6b) prąd:

- w części wspólnej

$$I'_{cn} = r_3 \, I_{3n}, \tag{31}$$

- w części szeregowej, którą stanowią części (A – B) i (B – C) uzwojenia

$$I_{abn} = (1 - r_3) I_{3n}. \tag{32}$$

Korzystając z zależności (24, 25, 29, 30, 31,32) i uwzględniając, że

$$\frac{U_{1n} - U_{2n}}{U_{3n}} = \frac{r_2}{1 - r_3}, \tag{33}$$

$$\frac{U_{1n} - U_{3n}}{U_{3n}} = \frac{r_3}{1 - r_3}, \tag{34}$$

$$\frac{U_{3n}}{U_{2n}} = \frac{1 - r_3}{1 - r_2}, \tag{35}$$

moce własne części składowych uzwojenia:

- przy znamionowym obciążeniu tylko strony średniego napięcia

$$S'_{cn} = \frac{U_{3n}}{U_{2n}} r_2 S_{2n} = \frac{1 - r_3}{1 - r_2} r_2 S_{2n}, \tag{36}$$

$$S'_{bn} = \frac{U_{2n} - U_{3n}}{U_{2n}} r_2 S_{2n} = \frac{r_3 - r_2}{1 - r_2} r_2 S_{2n}, \tag{37}$$

$$S'_{an} = \frac{U_{1n} - U_{2n}}{U_{2n}} (1 - r_2) S_{2n} = r_2 S_{2n}, \tag{38}$$

- przy znamionowym obciążeniu tylko strony dolnego napięcia

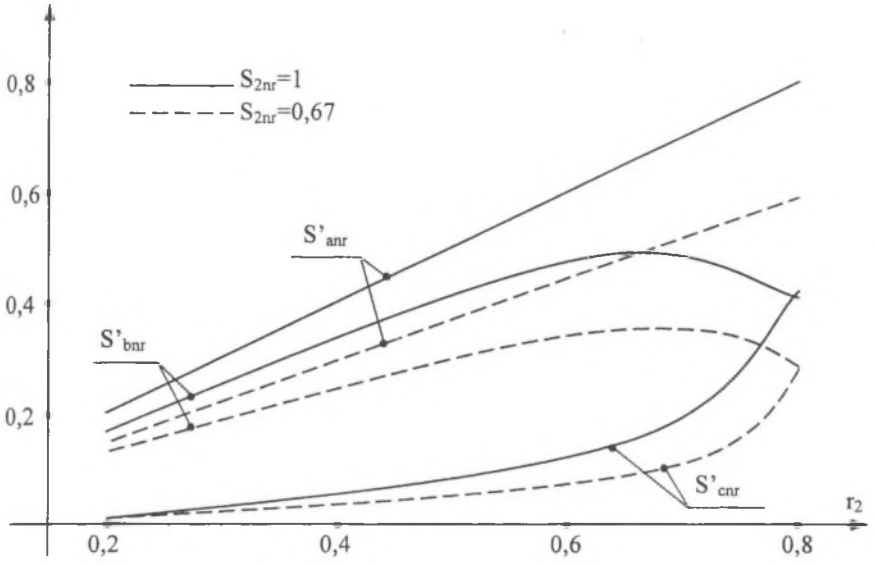
$$S''_{cn} = r_3 S_{3n}, \tag{39}$$

$$S''_{bn} = \frac{U_{2n} - U_{3n}}{U_{3n}} (1 - r_3) S_{3n} = (r_3 - r_2) S_{3n}, \tag{40}$$

$$S''_{an} = \frac{U_{1n} - U_{2n}}{U_{3n}} (1 - r_3) S_{3n} = r_2 S_{3n}. \tag{41}$$

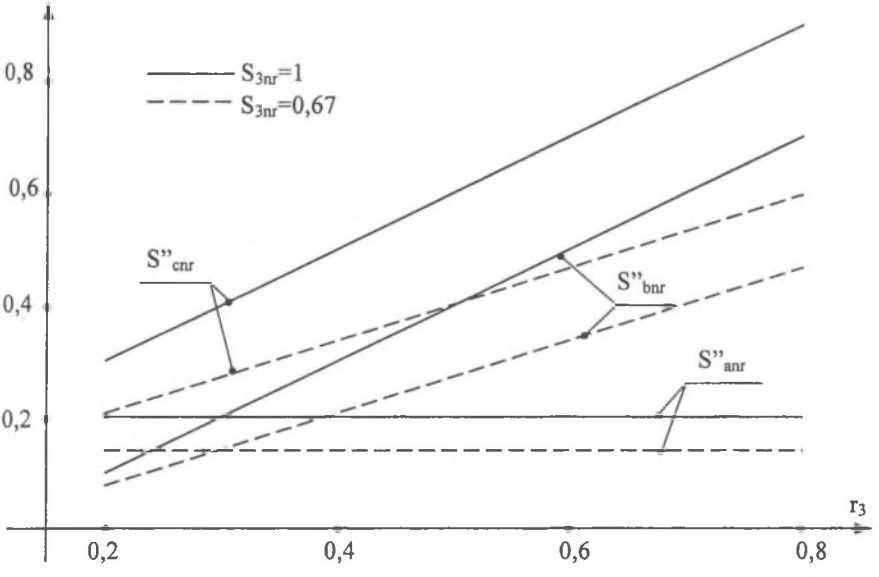
Na rys. 7, 8 przedstawiono zależności względnych mocy części składowych uzwojenia:

- S'_{cnr}, S'_{bnr}, S'_{anr} od współczynników redukcji przy obciążeniu tylko strony średniego napięcia względną mocą $S_{2nr} = 1$ oraz $S_{2nr} = 0{,}67$,
- S''_{cnr}, S''_{bnr}, S''_{anr} od współczynników redukcji przy obciążeniu tylko strony dolnego napięcia względną mocą $S_{3nr} = 1$ oraz $S_{3nr} = 0{,}67$.



Rys. 7. Zależności $S'_{cnr}=f(r_2)$, $S'_{bnr}=f(r_2)$, $S'_{anr}=f(r_2)$ przy $r_3=0,9$ i względnych mocach znamionowych $S_{2nr}=1$, $S_{2nr}=0,67$

Fig. 7. Dependences $S'_{cnr}=f(r_2)$, $S'_{bnr}=f(r_2)$, $S'_{anr}=f(r_2)$ for $r_3=0,9$ and the relative powers $S_{2nr}=1$, $S_{2nr}=0,67$



Rys. 8. Zależności $S''_{cnr}=f(r_3)$, $S''_{bnr}=f(r_3)$, $S''_{anr}=f(r_3)$ przy $r_2=0,2$ i względnych mocach znamionowych $S_{3nr}=1$, $S_{3nr}=0,67$

Fig. 8. Dependences $S''_{cnr}=f(r_3)$, $S''_{bnr}=f(r_3)$, $S''_{anr}=f(r_3)$ for $r_2=0,2$ and the relative powers $S_{3nr}=1$, $S_{3nr}=0,67$

Moce części składowych uzwojenia powinny być określone przy uwzględnieniu wymagań stawianych autotransformatorowi z uzwojeniem trójczęściowym przy obciążeniu:
- obydwu części wtórnych,
- dowolnej, lecz tylko jednej stronie wtórnej.

Przy zadanych znamionowych
- napięciach U_{1n}, U_{2n}, U_{3n},
- mocach S_{2n}, S_{3n} stron wtórnych

i założonych współczynnikach mocy $\cos\varphi_2$, $\cos\varphi_3$, odbiorów za moc znamionową należy przyjąć największą spośród mocy określonych wyrażeniami:
- 26, 36, 39 dla części wspólnej (C – X) uzwojenia,
- 27, 37, 40 dla części wspólnej (B – C) uzwojenia,
- 28, 38, 41 dla części szeregowej (A – B) uzwojenia.

3. PORÓWNANIE TRANSFORMATORA TRÓJUZWOJENIOWEGO Z AUTOTRANSFORMATOREM O UZWOJENIU TRÓJCZĘŚCIOWYM

Dla porównania przyjęto transformator trójuzwojeniowy obniżający napięcie o znamionowych mocach, napięciach i stratach w uzwojeniach:
$S_{1n}=S_n=160$ kV·A, $U_{1n}=500$ V, $\Delta P_{u1n}=1150$ W – uzwojenie górnego napięcia,
$S_{2n}=100$ kV·A, $U_{2n}=400$ V, $\Delta P_{u2n}=650$ W - uzwojenie średniego napięcia,
$S_{3n}=100$ kV·A, $U_{3n}=230$ V, $\Delta P_{u3n}=600$ W - uzwojenie dolnego napięcia.

Przy znamionowym obciążeniu prądowym wszystkich uzwojeń transformatora:
- względny prąd obciążenia strony pierwotnej $i_{1nr}=1$,
- względne prądy obciążenia stron wtórnych sprowadzone do mocy znamionowej transformatora

$$i_{2nr} = \frac{S_{2n}}{S_n} = 0{,}625,$$

$$i_{3nr} = \frac{S_{3n}}{S_n} = 0{,}625,$$

a z zależności (1) wynika, że stan taki wystąpi, jeżeli

$$\cos(\varphi_3 - \varphi_2) = \frac{i_{1nr}^2 - i_{2nr}^2 - i_{3nr}^2}{2 i_{2nr} i_{3nr}} = 0{,}28.$$

Moce znamionowe uzwojeń stron wtórnych transformatora

$$S_{2n} = S_{3n} < S_{1n},$$

a więc niezależne znamionowe obciążenie każdej ze stron wtórnych jest zawsze dopuszczalne.

Autotransformator o uzwojeniu trójczęściowym równoważny transformatorowi trójuzwojeniowemu ma te same napięcia znamionowe poszczególnych stron i umożliwia obciążenie:

- stron wtórnych mocami S_{2n}, S_{3n}, jeżeli $\cos(\varphi_3-\varphi_2)=0{,}28$,
- tylko jednej strony wtórnej, np. średniego napięcia mocą S_{2n} lub dolnego napięcia mocą S_{3n}.

Dla równoważnego autotransformatora o uzwojeniu trójczęściowym współczynniki redukcji

$$r_2 = \frac{U_{1n} - U_{2n}}{U_{1n}} = 0{,}2,$$

$$r_3 = \frac{U_{1n} - U_{3n}}{U_{1n}} = 0{,}54.$$

Dla określonych współczynników redukcji moce znamionowe części składowych uzwojenia autotransformatora wynoszą:

$$S_{ca} = 58{,}25\ \mathrm{kV \cdot A},\quad S_{ba} = 34\ \mathrm{kV \cdot A},\quad S_{aa} = 32\ \mathrm{kV \cdot A}$$

i są to największe moce spośród mocy

$$\underline{S_{cn} = 58{,}25\ \mathrm{kV \cdot A},}\qquad S'_{cn} = 11{,}5\ \mathrm{kV \cdot A},\qquad S''_{cn} = 54\ \mathrm{kV \cdot A}$$

$$S_{bn} = 32{,}66\ \mathrm{kV \cdot A}\qquad S'_{bn} = 8{,}5\ \mathrm{kV \cdot A},\qquad \underline{S''_{bn} = 34\ \mathrm{kV \cdot A}}$$

$$\underline{S_{an} = 32\ \mathrm{kV \cdot A},}\qquad S'_{an} = 20\ \mathrm{kV \cdot A},\qquad S''_{an} = 20\ \mathrm{kV \cdot A}$$

obliczonych zgodnie z zależnościami (26, 36, 39), (27, 37, 40), (28, 38, 41).

Stosunek

$$\frac{S_{ca} + S_{ba} + S_{aa}}{S_{3n} + S_{2n} + S_{1n}} = 0{,}345,$$

a więc wymiary geometryczne rdzenia magnetycznego i uzwojeń równoważnego autotransformatora będą znacznie mniejsze od analogicznych wielkości dla transformatora trójuzwojeniowego.

Zastosowanie autotransformatora zmniejsza koszty budowy i koszty energii wynikające ze strat w rdzeniu magnetycznym w czasie jego eksploatacji.

Przy znamionowym obciążeniu prądowym wszystkich uzwojeń transformatora, a więc przy znamionowych mocach obciążenia S_{2n}, S_{3n} stron wtórnych i $\cos(\varphi_3-\varphi_2) = 0{,}28$ straty znamionowe w uzwojeniach transformatora

$$\Delta P_{utn} = \Delta P_{u1n} + \Delta P_{u2n} + \Delta P_{u3n} = 1150 + 650 + 600 = 2400\,W\,.$$

Straty w uzwojeniach równoważnego autotransformatora w takich samych warunkach obciążenia można w przybliżeniu wyznaczyć oceniając najpierw rezystancje części składowych uzwojenia.

Przyjmując jednakowe średnie długości zwojów i jednakowe warunki chłodzenia (gęstości prądów):

- po uwzględnieniu zależności (21) rezystancja części wspólnej

$$R_c = \frac{I_{3n}}{I_{cn}} R_{3t} = \frac{R_{3t}}{\sqrt{r_3^2 + \left(\frac{S_{2n}}{S_{3n}}\right)^2 \left(\frac{1-r_3}{1-r_2}\right)^2 r_2^2 + 2r_2 r_3 \frac{S_{2n}(1-r_3)}{S_{3n}(1-r_2)} cos(\varphi_3 - \varphi_2)}}\,, \quad (42)$$

- po uwzględnieniu zależności (24, 32, 35) rezystancja części wspólnej

$$R_b = \frac{N_2 - N_3}{N_2} \cdot \frac{I_{2n}}{I_{abn}} R_{2t} = \frac{U_{2n} - U_{3n}}{U_{2n}} \cdot \frac{I_{2n} R_{2t}}{(1-r_3) I_{3n}} = \frac{(r_3 - r_2) S_{2n}}{(r_3 - r_2)^2 S_{3n}} R_{2t}\,, \quad (43)$$

- po uwzględnieniu zależności (6) rezystancja części szeregowej

$$R_a = \frac{N_1 - N_2}{N_1} R_{1t} = \frac{U_{1n} - U_{12}}{U_{1n}} R_{1t} = r_2 R_{1t}\,, \quad (44)$$

przy czym:

R_{1t}, R_{2t}, R_{3t} -rezystancje uzwojeń górnego, średniego i dolnego napięcia transformatora.

Uwzględniając, że $S_{2n}=S_{3n}$, $\cos(\varphi_3-\varphi_2)=0{,}28$, $r_2=0{,}2$, $r_3=0{,}54$ otrzymuje się:

$$R_c=1{,}717\,R_{3t},\ R_b=0{,}53\,R_{2t},\ R_a=0{,}2\,R_{1t}.$$

Jeżeli autotransformator pracuje w takich samych warunkach, jak transformator trójuzwojeniowy, to

- po uwzględnieniu zależności (21) straty w części wspólnej

$$\Delta P_{ucn} = \left(\frac{I_{cn}}{I_{3n}}\right)^2 \frac{R_c}{R_{3t}} \Delta P_{u3n} =$$

$$= \frac{R_c}{R_{3t}} \Delta P_{u3n} \sqrt{r_3^2 + \left(\frac{S_{2n}}{S_{3n}}\right)^2 \left(\frac{1-r_3}{1-r_2}\right)^2 r_2^2 + 2r_2 r_3 \frac{S_{2n}(1-r_3)}{S_{3n}(1-r_2)} cos(\varphi_3 - \varphi_2)}, \quad (45)$$

- po uwzględnieniu zależności (22) straty w części wspólnej

$$\Delta P_{ubn} = \left(\frac{I_{bn}}{I_{2n}}\right)^2 \frac{R_b}{R_{2t}} \Delta P_{u2n} =$$

$$= \frac{R_b}{R_{2t}} \Delta P_{u2n} \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{S_{3n}}{S_{2n}}\right)^2 (1-r_2)^2 - 2r_2(1-r_2)\frac{S_{3n}}{S_{2n}} cos(\varphi_3 - \varphi_2)}, \tag{46}$$

- straty w części szeregowej

$$\Delta P_{uan} = \frac{R_a}{R_{1t}} \Delta P_{u1n}. \tag{47}$$

Uwzględniając, że: $S_{2n} = S_{3n}$, $\cos(\varphi_3 - \varphi_2) = 0{,}28$, $r_2 = 0{,}2$, $r_3 = 0{,}54$, $\Delta P_{u1n} = 1150$ W, $\Delta P_{u2n} = 650$ W, $\Delta P_{u3n} = 600$ W otrzymuje się: $\Delta P_{ucn} = 600$ W, $\Delta P_{ubn} = 264{,}7$ W, $\Delta P_{uan} = 230$ W. W tych samych warunkach pracy stosunek strat w uzwojeniu autotransformatora do strat w uzwojeniach transformatora

$$\frac{\Delta P_{ucn} + \Delta P_{ubn} + \Delta P_{uan}}{\Delta P_{u1n} + \Delta P_{u2n} + \Delta P_{u3n}} = 0{,}456,$$

a więc zastosowanie autotransformatora o uzwojeniu trójczęściowym zamiast transformatora trójuzwojeniowego zmniejsza straty w uzwojeniu, a tym samym koszty transformowania napięć. Stopień zmniejszenia zarówno kosztów budowy, jak kosztów energii wynikających ze strat przy transformowaniu napięć zależy głównie od współczynników redukcji, a więc przekładni napięciowych. Te przykładowe obliczenia wykazują że stosowanie autotransformatorów o uzwojeniach trójczęściowych jest uzasadnione, jeżeli nie zachodzi potrzeba elektrycznego rozdzielenia strony pierwotnej i stron wtórnych.

LITERATURA

1. Jabłoński M.: Transformatory. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1994.
2. Jezierski E.: Transformatory – podstawy teoretyczne. WNT, Warszawa 1975.
3. Mizia W.: Transformatory. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
4. Mizia W.: Teoretical analysis of power autotransformers. International Worskhop on Electric Machines in Prague 1998.
5. Turowski J.: Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych. WNT, Warszawa 1982.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Piotr Wach

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 grudnia 1998 r.

Abstract

The new type of an autotransformer whose winding consists of three parts and which can replace a three-winding transformer if three is no need of electric separation of the primary side from the secondary ones has been presented in the paper. The basic properties of the three-winding transformer have been given. Currents and powers of the autotransformer winding component parts – a series one and two common ones – at the given powers and power factors of the secondary side loads have been determined. The great influence of the so-called reduction coefficients which depend on voltage ratios has been shown (Figs. 4 and 5). The requirements which the three – part winding autotransformer equivalent to the three-winding transformer should comply with have been formulated. Powers of the equivalent autotransformer winding component parts have been determined when taking into account possibility of its operation at the independent rated load of any of the secondary sides. Comparison of the equivalent autotransformer and the three-winding transformer has been made. It has been proved that use of the autotransformer decreases manufacturing costs and costs of loss of energy due to voltage transformation.